

面向智慧工地的建筑智能化及机器人技术

张雪芹 张继丁 汪黎 张皓翔 任鹏宇
重庆市建筑科学研究院有限公司 重庆 400016

摘要：本文探讨面向智慧工地的建筑智能化及机器人技术。阐述建筑智能化技术体系，包括感知层、数据传输处理、智能决策管控技术；分析建筑机器人技术体系，涵盖施工、运维管理类机器人及协同技术。介绍核心应用场景，如施工过程、安全环境、协同管理管控。提出技术、应用模式、保障体系优化路径，为智慧工地建设提供技术参考与发展方向。

关键词：智慧工地；建筑智能化；建筑机器人；技术体系；优化路径

引言：传统建筑行业面临效率、安全、资源利用等诸多挑战，智慧工地成为行业转型关键。建筑智能化与机器人技术的融合，为工地管理带来新契机。智能化技术可实现工地全方位感知、精准决策与高效管控，建筑机器人能替代人工完成危险、繁重任务，提升施工质量与效率。深入探讨这两类技术，对推动建筑行业数字化、智能化发展具有重要意义。

1 面向智慧工地的建筑智能化技术体系

1.1 工地感知层智能化技术

环境感知技术通过温湿度、噪声、粉尘、空气质量等专用传感器，实时采集工地各类环境参数，为扬尘治理、噪声管控、作业时段调整等环境管理工作提供数据支撑，助力工地维持合规的施工环境^[1]。人员感知技术整合定位、身份识别与行为状态监测功能，定位技术追踪人员实时位置，身份识别规范人员准入，行为监测识别疲劳作业、违规操作等情况，实现对人员的动态管控，保障作业安全。设备与物料感知技术聚焦施工设备与物料管理，针对塔吊、挖掘机等设备，通过传感器监测转速、负载等运行状态并及时预警故障；对钢筋、混凝土等物料，依托定位与识别技术追踪数量及位置，提升设备与物料的管理效率。施工过程感知技术涵盖进度可视化监测、结构沉降与变形监测、工序质量实时检测，精准捕捉施工全流程关键数据，为进度把控、安全防范与质量管控提供依据。

作者简介：张雪芹（1968），男，博士，担任重庆市建筑科学研究院有限公司博士后导师，研究方向：建筑科学技术研究、检测技术与结构鉴定，建筑与房地产管理、工程监理与造价咨询等。

基金项目：重庆市建设科技计划项目（城科字2024第3-21）；重庆设计集团关键技术类项目（2023-C3）。
参与人：张雪芹 张继丁 汪黎 张皓翔 任鹏宇

1.2 数据传输与处理智能化技术

数据传输技术以5G、物联网、边缘计算网关为核心，5G保障高速数据传输，物联网实现设备互联互通，边缘计算网关在现场预处理数据，三者协同确保感知层数据低延迟、稳定传输，打通工地各终端与平台的数据通道。数据存储与管理技术依靠分布式数据库与数据中台，统一存储环境、人员、设备、施工等异构数据，通过分类整理与标准化处理，实现数据高效调用。数据智能分析技术运用大数据分析 with 人工智能算法，对采集的数据进行关联分析、趋势预测与异常识别，从海量数据中提取有效信息，为工地管理决策提供科学支撑，让决策更贴合施工实际需求。

1.3 智能决策与管控技术

施工进度智能管控技术整合施工计划与实时进度数据，自动分析进度偏差并推荐纠偏方案，保障工程按计划推进。安全智能管控技术融合人员违规、设备故障、环境风险等数据，自动研判安全风险，精准推送预警信息并辅助制定应急处置方案。质量智能管控技术对比施工工序检测数据与质量标准，自动识别质量缺陷、分析原因并跟踪整改措施，提升质量管控精度。资源智能调配技术分析设备利用率、物料消耗速度与人员配置情况，动态优化机械、物料、人力调配，减少资源浪费。

2 面向智慧工地的建筑机器人技术体系

2.1 施工类建筑机器人技术

结构施工机器人技术涵盖混凝土整平、钢筋绑扎、钢结构安装等机器人。高精度定位与导航技术帮助机器人在复杂工地精准定位作业位置，作业末端执行器依据施工需求设计，适配不同结构施工场景，多关节运动控制技术保障机器人灵活调整动作，替代人工完成重复且高强度的结构施工环节^[2]。装修与安装机器人技术包含墙面抹灰、瓷砖铺贴、管道安装等机器人，聚焦作业精

度控制确保施工效果统一,墙面与地面适应能力让机器人应对不同平整度的作业面,复杂户型作业路径规划技术助力机器人在多样户型中高效完成装修安装,提升施工效率与质量稳定性。土方与基础施工机器人技术有无人挖掘机、无人推土机、桩基施工机器人,自主路径规划技术让机器人规划合理施工路线,障碍物识别与规避技术帮助避开工地杂物与人员,作业参数自适应调节技术使机器人根据土壤硬度、桩基深度等实时调整作业参数,适应复杂场地的基础施工需求。

2.2 运维与管理类建筑机器人技术

工地巡检机器人技术分为地面巡检机器人与空中巡检无人机,地面巡检机器人采用轮式或履带式设计适应工地地形,空中巡检无人机覆盖大范围区域,二者均具备环境感知、自主导航能力,能识别安全隐患与设备故障,实现工地全区域不间断巡检。物料搬运机器人技术包括自动导引车、无人叉车,精准定位技术确保机器人准确抵达物料存放与作业地点,路径优化技术规划高效搬运路线,货物识别与抓取技术帮助机器人稳定搬运不同类型物料,实现工地物料从仓储到作业面的自动化运输。环境治理机器人技术涵盖喷雾降尘、垃圾清理等机器人,自主移动技术让机器人在工地灵活移动,环境参数响应功能使机器人根据粉尘浓度等自动启动作业,作业范围自主规划技术帮助机器人覆盖需治理区域,辅助工地做好环境管控。

2.3 机器人与智能化系统协同技术

数据交互技术搭建建筑机器人与智慧工地管理平台的沟通桥梁,机器人将施工进度、质量检测结果等作业数据上传至平台,平台结合工地整体情况向机器人下达作业指令与参数调整方案,实现数据实时互通。任务协同调度技术依据工地施工计划与实时工况,为多台不同类型机器人分配任务,协调巡检与施工机器人、搬运与安装机器人的作业路径,避免出现作业冲突。环境协同适应技术整合工地感知系统获取的地形、障碍物、温湿度等环境数据,实时提供给机器人,机器人据此优化运动轨迹与作业策略,进一步提升在复杂工地环境中的适应能力。

3 建筑智能化及机器人技术在智慧工地的核心应用场景

3.1 施工过程智能化管控场景

进度动态管控中,施工过程感知技术持续采集各工序完成情况等实时进度数据,智能分析算法将这些数据与施工计划对比,自动识别进度偏差并推送人员增补、工序优化等纠偏建议。施工机器人接收智能调度指令,按既定

节奏执行结构施工、装修安装等作业,助力保障各进度节点顺利达成。质量精准管控依托质量感知技术,实时检测混凝土强度、钢筋间距等工序质量参数,智能分析技术从检测数据中识别裂缝、尺寸偏差等质量缺陷^[3]。施工机器人凭借高精度作业控制能力,减少人工操作带来的质量波动,同时记录作业全过程数据,实现施工质量的全程可追溯。资源高效调配环节,设备与物料感知技术实时监控施工机械运行状态、物料存储数量及位置等资源信息,智能调配系统结合施工进度与各区域需求,优化机械、物料、人力的分配方案。物料搬运机器人按照调度指令,自动完成物料从仓储区到作业面的运输,减少资源闲置与搬运耗时,提升资源周转效率。

3.2 工地安全与环境管控场景

安全风险防控通过人员感知技术,借助定位设备与视频识别,监测人员是否佩戴安全帽、是否擅自进入高空作业区、深基坑等危险区域。设备感知技术实时采集塔吊力矩、电梯运行速度等参数,发现异常立即发出故障预警。巡检机器人采用轮式或履带式设计适应工地复杂地形,搭配高清摄像头与红外传感器,不间断巡查临边防护、临时用电线路、脚手架等关键部位,排查坍塌隐患、线路老化等安全问题,发现异常实时推送预警信息至管理人员,联动安全管控系统启动设备停机、人员疏散等应急措施。环境智能治理中,环境感知技术通过粉尘传感器、噪声监测仪,持续采集施工区域颗粒物浓度、噪声分贝等数据。当监测数值超出标准限值时,系统自动触发喷雾降尘机器人、隔声屏障调节设备启动作业。智能分析技术结合历史监测数据与气象预报,预测粉尘扩散、噪声传播趋势,提前制定错峰施工、增加降尘频次等管控策略,助力工地维持符合要求的施工环境。

3.3 工地协同管理场景

多方协同办公以智能化协同平台为核心,整合施工方的进度报表、监理方的质量检测记录、建设方的审批意见等多方数据。平台支持施工计划调整、质量问题整改、安全报告提交等信息实时共享,还能同步施工机器人作业数据与设备运行状态,各方人员可在线查看数据、发起审批流程,避免纸质文件传递延误,打破参与方之间的信息壁垒,提升协作效率。远程监控与指挥依托工地感知数据与全域视频监控系統,管理人员通过电脑、移动终端即可远程查看各作业面施工进度、人员分布、设备运行状态等实时工况。遇到材料短缺、设备故障等突发问题,智能决策系统结合现场数据快速生成处置方案,管理人员通过平台远程调度物料搬运机器人紧急送料,或安排维修人员到场处理,可实时追踪处置进

度,实现对工地的高效远程管控。

4 面向智慧工地的建筑智能化及机器人技术优化路径

4.1 技术体系优化

提升技术环境适应性需针对性研发感知设备,聚焦高温、高湿、强电磁干扰等工地复杂环境,改进传感器封装工艺,增强设备抗恶劣环境能力,同时优化信号处理技术,减少环境干扰对数据采集精度的影响。联合行业力量制定统一的感知设备数据接口标准,规范不同品牌、类型设备的数据传输格式,实现各类感知设备数据无缝互通,打破数据采集环节的技术壁垒。强化机器人自主作业能力要整合多传感技术,将激光雷达的环境探测优势、视觉识别的细节捕捉能力、惯性导航的定位稳定性相结合,提升机器人在障碍物密集、地形多变等复杂环境下的定位与导航精度^[4]。研发基于实时工况的动态路径规划算法,让机器人能根据工地人员流动、设备调度等即时变化调整作业路径,增强应对突发状况的应变能力。推动技术深度融合需构建智慧工地统一数据中台,整合感知层采集的环境、人员、设备数据,分析层的智能算法模型,决策层的管控指令,实现各系统数据与功能的深度协同。开发机器人与智能化平台的标准化对接接口,确保机器人作业数据能实时上传至平台,平台指令可精准下达至机器人,打造“感知-分析-决策-执行”的闭环管理体系。

4.2 应用模式优化

推进技术与施工流程协同要结合施工场景差异,针对标准化住宅施工的重复性工序、非标准化场馆建设的复杂工艺,研发模块化、可定制的智能化技术与机器人系统,通过模块组合与参数调整实现技术与施工流程的柔性适配。建立技术应用前的流程适配评估机制,组织技术人员、施工人员共同分析技术与工序的匹配度,提前解决适配问题,确保技术贴合实际施工需求。构建高效运维与升级体系需搭建智能化设备与机器人的远程运维平台,实时采集设备运行参数,通过数据比对与异常分析实现故障预警,远程指导现场人员快速修复。采用模块化设计理念拆分设备与系统组件,升级时仅更换对应模块,降低技术升级的成本与兼容性问题,实现系统与设备的渐进式升级。加强人员技术适配培养要构

建“理论+实操”复合型人才培养体系,高校在土木工程、机械工程专业增设智慧工地技术课程,讲解智能化系统原理与机器人作业逻辑;企业定期开展在职人员培训,通过设备实操、模拟作业等方式提升人员操作能力。通过技术演示会、试点项目观摩等形式,让人员直观感受技术优势,提升对技术的接受度与应用能力。

4.3 保障体系优化

完善技术标准体系需联合行业协会、科研机构与企业组建标准制定小组,围绕建筑智能化技术,明确感知设备的精度阈值、数据存储与传输格式、系统接口通信协议等统一标准;针对建筑机器人,制定涵盖性能测试指标、作业操作规范、安全运行认证等内容为标准体系,为技术研发与应用提供统一依据。缓解成本投入压力可推动多方协作,支持相关部门出台专项补贴政策,对建筑企业的智能化改造项目、机器人采购费用给予一定补贴;鼓励行业内企业组建联盟,开展技术共享与设备租赁业务,让中小型企业通过租赁方式使用先进设备,降低技术应用门槛。加强产学研合作,推动高校、科研机构的技术成果与企业生产需求对接,缩短研发周期,降低技术研发成本,加速技术成果产业化落地。

结束语

建筑智能化及机器人技术为智慧工地建设注入强大动力。通过构建完善的技术体系,实现施工过程、安全环境、协同管理等多场景的智能化管控。未来,需持续优化技术体系、应用模式与保障体系,提升技术适应性、应用效能与成本效益。随着技术不断进步,智慧工地将更高效、安全、绿色,推动建筑行业迈向高质量发展新阶段。

参考文献

- [1]贾原.探讨建筑施工中智慧工地系统的应用[J].智慧中国,2022(06):76-77.
- [2]杨超.建筑工程智慧工地建设研究[J].建材发展导向,2021,19(16):196-197.
- [3]范诗建,刘栋.浅析智慧工地在项目安全管理中的应用与发展[J].工程建设标准化,2021(S1):74-76.
- [4]陈定方.智慧工地系统在建筑施工领域的应用[J].中国住宅设施,2022,(10):28-30.